

Analiza integralności budynków wielokondygnacyjnych poddanych obciążeniom wyjątkowym

Krzysztof Cichocki, Mariusz Ruchwa

Katedra Mechaniki Budowli, Politechnika Koszalińska
email: krzysztof.cichocki@tu.koszalin.pl, mariusz.ruchwa@wbiis.tu.koszalin.pl

STRESZCZENIE: Celem niniejszej pracy jest określenie integralności konstrukcji budynków wielokondygnacyjnych poddanych działaniu obciążeń o charakterze wyjątkowym (wybuchy, uderzenia). Określono główne problemy związane z analizą numeryczną budynków wielokondygnacyjnych, budowy modelu dyskretnego konstrukcji oraz modelowaniu obciążenia o charakterze nagłym. Nawiązano do prac teoretycznych dotyczących kryteriów oceny ryzyka, zwłaszcza wyznaczenia obiektywnych kryteriów jego akceptacji. Przeprowadzono także przykładową analizę numeryczną wybranej konstrukcji budynku wielokondygnacyjnego Metodą Elementów Skończonych, jako ilustrację omawianych zagadnień. Wyniki wykonanych analiz numerycznych pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych.

SŁOWA KLUCZOWE: symulacja numeryczna, obciążenia wyjątkowe, integralność konstrukcji

1. Wprowadzenie

W celu określenia integralności konstrukcji, rozumianej jako zdolność do zachowania częściowej funkcjonalności po zniszczeniu części jej elementów, należy poddać szczegółowej analizie proces propagacji zniszczenia w konstrukcji poddanej obciążeniom wyjątkowym (wybuchy, uderzenia). Stosowane często zastępcze analizy statyczne, konstrukcji z usuniętymi wybranymi elementami nośnymi, jedynie częściowo oddają zjawisko odpowiedzi dynamicznej konstrukcji w przypadku nagłego zniszczenia elementów nośnych.

Stateczność oraz integralność konstrukcji budowlanych (a w szczególności budynków wielokondygnacyjnych) jest przedmiotem badań naukowych prowadzonych w ramach międzynarodowego programu badawczego *COST TU0601 „Robustness of Structures”*, których celem jest określenie kryteriów oceny konstrukcji pod względem jej integralności i odporności na lokalne uszkodzenia.

Ważnym narzędziem w tego rodzaju analizach są numeryczne symulacje wybranych przypadków kombinacji konstrukcja-obciążenie. W sytuacjach obciążeń wyjątkowych, zwłaszcza charakteryzujących się dużą intensywnością i krótkim czasem działania (obciążenia impulsem) utrudnione jest uproszczone modelowanie zachowania konstrukcji. Powstanie zniszczeń w materiale konstrukcji wywołane jest propagacją fali naprężeń, jej odbiciem od powierzchni elementów konstrukcji, interferencją fali odbitej z padającą, itp [1].

Istotnym zagadnieniem jest problem określenia jednoznacznych kryteriów oceny integralności, w miarę możliwości wyrażonych przy zastosowaniu niewielkiej liczby parametrów. Propozycje doboru takich parametrów przedstawione zostały w materiałach *Joint Committee of Structural Safety* [2] oraz w końcowym raporcie akcji *COST TU0601* [3].

Wcześniejsze badania prowadzone przez autorów niniejszej pracy wykazały decydujący wpływ założonego w analizie modelu materiałowego na jakość wyników uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu Metody Elementów Skończonych [1, 4]. W przypadku obciążeń o charakterze nagłym, model materiałowy musi uwzględniać wpływ prędkości odkształcenia, powstawanie oraz rozwój zniszczenia itp.

2. Kryteria oceny integralności konstrukcji

Sformułowanie jednoznacznych kryteriów oceny integralności konstrukcji poddanej działaniu określonego typu obciążeń wyjątkowych jest trudne ze względu na mnogość możliwych scenariuszy działania obciążenia. W praktyce stosuje się ograniczenie analizowanych przypadków do tych, które intuicyjnie uznano za najbardziej reprezentatywne. Tym niemniej nie wyczerpuje to możliwych kombinacji intensywności obciążenia, obszaru jego działania, sposobu propagacji zniszczenia w elementach konstrukcji, jak też wzajemnej interakcji zniszczonych elementów z pozostałą częścią konstrukcji.

Symulacje numeryczne pozwalają na relatywnie łatwą analizę odpowiedzi konstrukcji na wiele scenariuszy obciążenia. Głównym problemem jest określenie zakresu akceptowalnych zniszczeń konstrukcji oraz strat wywołanych przez te zniszczenia. Ogólne zasady określenia akceptowanych strat podano w pracy [3], tym niemniej ich zastosowanie w konkretnym przypadku wymaga przeprowadzenia szczegółowych analiz oraz przyjęcia założeń dotyczących wartości poszczególnych parametrów określających poziom akceptacji zagrożeń.

3. Przykład analizy numerycznej

Analizie poddano konstrukcję żelbetowego garażu wielokondygnacyjnego wykonanego w technologii monolitycznej z betonu klasy B50 oraz stali A-III.

Rozmiary konstrukcji w rzucie poziomym to 100,0 m x 96,0 m, a łączna powierzchnia 28,8 tys. m². Słupy o wymiarach 0,5 m x 0,5 m są usytuowane w siatce 10,0 m x 9,0 m. Grubość żelbetowych płyt wynosi 0,4 m.

Model dyskretny oraz analiza konstrukcji zostały wykonane w systemie ABAQUS [5]. Obliczenia prowadzono w dwóch etapach: uwzględnienie ciężaru własnego i obciążenia użytkowego (Abaqus/Standard), wymuszenie wyjątkowe (Abaqus/Explicit).

W analizie zastosowano zaimplementowany nieliniowy sprężysto-plastyczny model materiałowy betonu ze zniszczeniem, opisany w pracach [1, 6]. Model bazuje na kontynuualnej mechanice zniszczenia, podanej przez Rabotnova [7]. Tensor naprężeń efektywnych dany jest zależnością:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_0 : (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (1)$$

gdzie \mathbf{D}_0 jest liniowo-sprężystą macierzą konstytutywną czwartego rzędu, ε jest tensorem odkształceń drugiego rzędu, zaś ε^p jest tensorem odkształceń plastycznych.

Zniszczenie materiału jest określone przez dwie zmienne skalarnie, przy rozciąganiu i ściskaniu. Dlatego konieczne jest rozdzielenie tensora naprężeń efektywnych (1) na składowe odpowiadające ściskaniu i rozciąganiu. Dla naprężeń głównych $\bar{\sigma}_i$ oraz ich kierunków określonych wektorami jednostkowymi \mathbf{p}_i uzyskujemy:

$$\bar{\sigma}^+ = \langle \bar{\sigma} \rangle = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\sigma}_i \rangle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}^- = \langle \bar{\sigma} \rangle = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\sigma}_i \rangle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i$$

Przyjęto formę swobodnej energii Helmholtza w postaci:

$$\Psi(\varepsilon, \varepsilon^p, d^+, d^-) = (1 - d^+) \Psi_0^+ + (1 - d^-) \Psi_0^- \quad (3)$$

gdzie

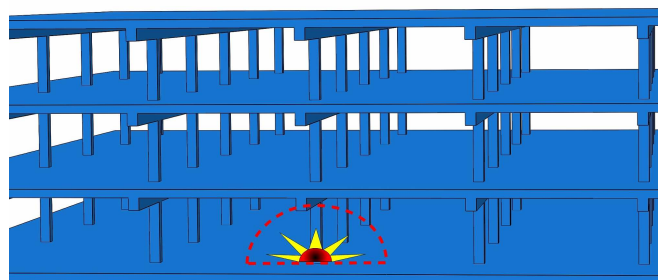
$$\Psi_0^+ = \Psi_0^+(\bar{\sigma}(\varepsilon, \varepsilon^p)) = \frac{1}{2} \bar{\sigma}^+ : \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\sigma}^+ \quad (4)$$

$$\Psi_0^- = \Psi_0^-(\bar{\sigma}(\varepsilon, \varepsilon^p)) = \frac{1}{2} \bar{\sigma}^- : \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\sigma}^- \quad (5)$$

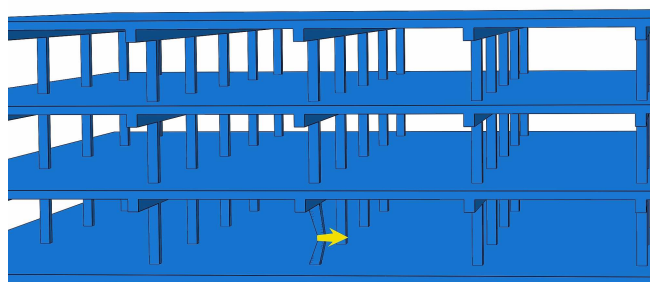
Szczegółowy opis zastosowanego modelu materiałowego wraz z komentarzem podano w pracy [1].

Rozpatrzono dwa rodzaje obciążeń wyjątkowych: wybuch powodujący zniszczenie elementu nośnego (słupa, rys. 1) oraz gwałtowne usunięcie elementu nośnego na skutek np. uderzenia (rys. 2).

W pierwszym przypadku wybuch obciąża nie tylko słup, ale także sąsiednie elementy, powodując powstanie uszkodzeń także w obszarze poza słupem.



Rys. 1. Wybuch w budynku garażowym



Rys. 2. Nagłe usunięcie słupa

Przeanalizowano także kilka wariantów działania wybuchu: różne wielkości ładunku znormalizowanego ładunku wybuchowego, jego różną lokalizację w obrębie słupa. Zbadano wpływ tych czynników na odpowiedź dynamiczną konstrukcji, zwłaszcza na zakres wynikowych zniszczeń elementów nośnych.

Analizę ograniczono do najniższej kondygnacji budynku. Wstępne analizy skutków wybuchu na wyższych kondygnacjach wykazały, że pomimo możliwości powstawania jednoczesnych zniszczeń w sąsiednich kondygnacjach (zwłaszcza dla większych wielkości ładunku wybuchowego), końcowy zakres zniszczeń konstrukcji jest bardziej ograniczony w porównaniu do wybuchu na najniższej kondygnacji.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza integralności konstrukcji budynku wielokondygnacyjnego poddanego działaniu obciążeń wyjątkowych od wybuchu oraz uderzenia wykazała, że:

- 1) możliwe jest określenie integralności konstrukcji poprzez wykonanie odpowiedniej analizy numerycznej, wykorzystującej zaawansowane modele materiałowe;
- 2) w przypadku działania wybuchu, konieczne jest uwzględnienie różnych scenariuszy obciążenia,
- 3) analiza uzyskanych wyników pozwala na sformułowanie kryteriów akceptacji zagrożenia według zaleceń JCSS [2].

Praca została zrealizowana w ramach międzynarodowego niewspółfinansowanego projektu 457/N-COST/2009/0 "Analiza stateczności i integralności budynków wielokondygnacyjnych poddanych obciążeniom wyjątkowym".

Literatura

- [1] Cichocki K., *Numerical Analysis of Concrete Structures under Blast Loading*, Koszalin University of Technology, 2008.
- [2] Joint Committee of Structural Safety (ed MH Faber), *Risk Assessment in Engineering Principles, System Representation and Risk Criteria*, ISBN 978-3-909386-78-9, 2008.
- [3] Rizzuto E., Cichocki K., *Acceptance criteria, Robustness of Structures: Proceedings of the Final Conference of COST Action TU0601*, Prague, 2011.
- [4] Ruchwa M., *Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Vol. LIX, 4 (660), s. 269-280, 2010.
- [5] *Abaqus Analysis User's Manual*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence 2010.
- [6] Faria R., Oliver X., *A Rate Dependent Plastic-Damage Constitutive Model for Large Scale Computations in Concrete Structures*, CIMNE, 1993.
- [7] Rabotnov Y.N., *Creep rupture*, Proc. of 12 Int. Congr. Appl. Mech., pp. 342-349, 1968.